

КОМБИНИРОВАННОЕ МАГНЕТРОННОЕ ОСАЖДЕНИЕ ОКСИДА ТИТАНА И ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ТИТАНА

А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов, К.Ю. Прокопчик
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, Минск, 220030, Беларусь,
Burmakov@bsu.by, KuleshovV@Yandex.ru, kir.prokopchik@gmail.com

Рассматривается структурная схема установки для комбинированного магнетронно-лазерного нанесения покрытий. В условиях одновременного реактивного магнетронного распыления и лазерной эрозии титана анализируются электрические характеристики магнетронного разряда. Установлено образование инициируемого лазерной плазмой импульсного дугового разряда и определено влияние условий осаждения на электрические характеристики этого разряда. Приведены условия комбинированного формирования пленочных покрытий на основе оксида титана.

Введение

Технологии нанесения пленочных покрытий широко используют магнетронное распыление и осаждение эрозионной лазерной плазмы. Формирование покрытий на одной подложке одновременно этими двумя методами может привести к новым свойствам покрытий. Основной особенностью такого совмещения является использование плазменных потоков, которые существенно отличаются по энергетике и плотности, по временным характеристикам воздействия на подложку и наличию в формируемом покрытии нано- и микро-размерных включений. Проведенные к настоящему времени исследования по магнетронно-лазерному осаждению немногочисленны и были связаны с получением и исследованием свойств композиционных покрытий на основе многослойных металлокерамических структур типа $Ti-Ti_xC_y$ на керамике [1], пленок SiC_x [2], TiC и $TiCN$ [3], нанокристаллических соединений углерода и алмазоподобных пленок [4]. Эффективность использования комбинированного магнетронно-лазерного осаждения для указанных выше и других приложений непосредственно связана с возможностями контроля и управления процессом формирования каждого из потоков, а также с особенностями взаимного их влияния в условиях комбинации потоков, что и явилось предметом наших исследований.

Экспериментальная установка и методика эксперимента

Установка комбинированного магнетронно-лазерного нанесения покрытий содержала следующие структурные блоки: вакуумная камера с системой откачки и подачи рабочих газов; расположенные в камере магнетрон, лазерная мишень и подложкодержатель; двухимпульсный лазер с системой ввода, фокусировки и сканирования лазерного луча по поверхности мишени; блок управления расходом аргона и реактивного газа; блок регистрации оптических эмиссионных характеристик плазменного потока; блок регистрации электрических характеристик магнетронного разряда.

Нами использован малогабаритный магнетронный распылитель с плоским титановым катодом диаметром 5 см, питаемый источником постоянного тока при мощности разряда 50-300 Вт.

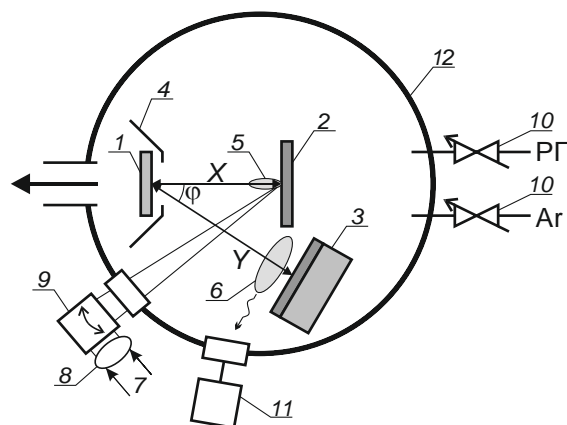


Рис. 1. Схема реализации методики магнетронно-лазерного осаждения: 1 – подложка, 2 – лазерная мишень, 3 – магнетрон, 4 – экран, 5 и 6 – лазерная и магнетронная плазма, 7 – лазерный луч, 8 и 9 – фокусирующая линза и устройство сканирования, 10 – управляемые натекатели аргона и кислорода, 11 – датчик оптической системы управления расходом реактивного газа (кислорода), 12 – вакуумная камера.

Лазерная плазма формировалась с помощью двухимпульсного лазера LS-2134D, работающего в однократном и частотном режиме 1–10 Гц на длине волны 532 нм с длительностью отдельного импульса 12 нс. Для изучения спектральных характеристик лазерной и магнетронной плазмы использован спектрометр S100 и монохроматор МДР-12 с ПЗС линейкой. Динамика электрических параметров магнетронного разряда и излучения лазерной плазмы регистрировалась цифровым осциллографом В-483 с временным разрешением 50 нс.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Формирование потока лазерной плазмы в процессах комбинированного нанесения покрытий должно проводиться в диапазоне давлений, которое определяется технологиями магнетронного распыления и обычно лежит в интервале от десятых долей до единиц Паскалей. Незначительность влияния давления на характеристики эрозионного факела при $P < 1$ Па подтверждают эмиссионные спектры лазерной плазмы, которые практически идентичны в диапазоне давлений 0.01-1 Па. В интервале давлении 1–100 Па на-

блюдается быстрый рост интенсивности спектральных линий. Интенсивность ионных линий Ti растет в 5.5–10 раз, причем максимальный рост наблюдается для линии с более высоким потенциалом возбуждения.

Характер эмиссионных оптических спектров лазерной плазмы существенно отличается от спектров магнетронного разряда. Основное отличие заключено в зарядовом составе плазмы. Преобладающим элементом спектра лазерной плазмы являются ионные линии титана, атомные линии наблюдаются в областях 478–493, 498–505 и 517–521 нм. В тоже время подавляющими элементами магнетронного разряда являются атомные линии титана и аргона. Наблюдаются отдельные относительно слабые ионные линии этих элементов, в основном, линии аргона.

Основным инструментом управления параметрами магнетронного разряда является его мощность. Нами установлено, что существенное влияние на характеристики потока может оказать потенциал металлического экрана перед подложкой (элемент 4 рис. 1). Заметное влияние потенциала наблюдается при его величине $+(20-30)$ В.

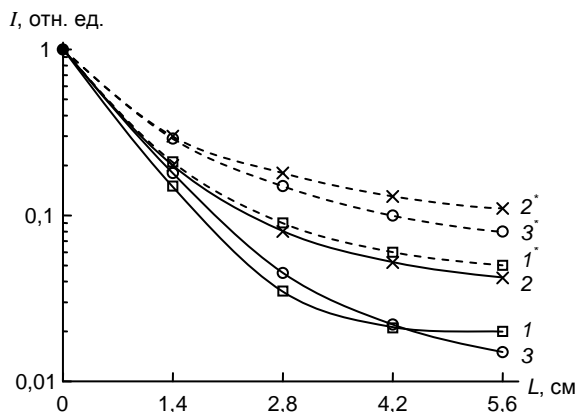


Рис. 2. Зависимость интенсивности спектральных линий плазмы магнетронного разряда вдоль его оси для заземленного экрана (1, 2, 3) и при его потенциале +25 В (1', 2', 3'). 1 – линии TiI, 2 – линии ArI, 3 – линия OI (777,3 нм).

На рис. 2 представлены распределения интенсивности атомных линий вдоль оси потока для случая заземленного экрана (потенциал анода) и для потенциала экрана +25 В. Напряжение горения разряда и его ток соответственно равны 395 В и 0,3 А. Зависимости получены в процессе нанесения пленки TiO_2 при расстоянии катод – подложка 7 см и нормированы на интенсивность линий прикатоной области, где влияние потенциала экрана мало. Зависимости для линий TiI и ArI получены в результате осреднения по нескольким линиям. Видно, что наличие потенциала приводит к значительному росту плотности возбужденных частиц с удалением от катода магнетрона. На расстоянии от катода 5,6 см интенсивность линии OI выросла почти в 6 раз, линий TiI – в 3 раза, линий ArI – в 2,5 раза. Такой рост плотности возбужденных атомов титана и кислорода может вызвать повышение их химической активности при взаимодействии потока с подложкой.

Это хорошо согласуется с результатами определения скорости роста пленки TiO_2 . При потенциале экрана +25 В и равенстве остальных условий осаждения скорость роста в 1,2 раза выше, нежели при заземленном экране. Кроме этого наличие потенциала экрана приводит к радиальному расширению излучающей области потока и соответственно проявляется как расширение области однородного покрытия на подложке.

На оптические спектры лазерной плазмы значительно влияет плотность мощности излучения на мишени. Увеличение плотности мощности в интервале 1,5–3,0 ГВт/см² приводит к росту интенсивности ионных линий с относительно высоким потенциалом возбуждения 6–8 эВ в 2,5–2,8 раза и в 1,7–2 раза для ионных линий с относительно низким потенциалом возбуждения 3–4 эВ. Интенсивность атомных линий практически не изменяется или незначительно падает. Это указывает на существенный рост относительного содержания ионной компоненты с ростом плотности мощности.

При формировании комбинированного плазменного потока обнаружен ряд закономерностей, связанных с влиянием лазерной плазмы на характеристики магнетронного разряда. На рис. 3 представлены осциллограммы тока и напряжения магнетронного разряда при плотности мощности одноимпульсного лазерного излучения 3 ГВт/см², мощности магнетронного разряда 120 Вт и давлении аргона 0,5 Па.

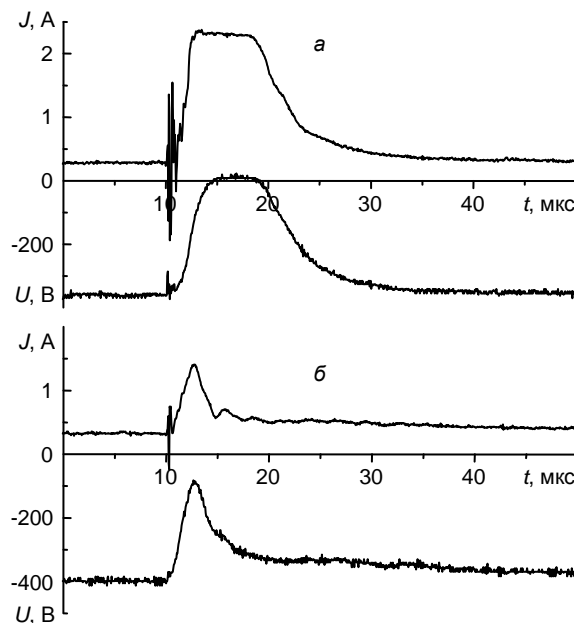


Рис. 3. Осциллограммы тока и напряжения магнетронного разряда при однократном воздействии лазерного излучения (а) и в частотном режиме генерации на частоте 5 Гц (б).

Видно, что при однократном воздействии лазерного излучения на мишень возникновение лазерной плазмы сопровождается формированием разряда с низким напряжением горения, равным разности потенциалов между катодом и экраном (5–15) В, которое характерно для дуговых разря-

дов. Следствием этого является кратковременное шунтирование магнетронного разряда. Дуговой разряд возникает при плотности мощности лазерного излучения $W > 0.5 \text{ ГВт/см}^2$. Для значений W в интервале $0.5\text{--}1.5 \text{ ГВт/см}^2$ полного шунтирования (спад напряжения до единиц вольт) не достигается. При $W > 1.5 \text{ ГВт/см}^2$ амплитуда тока достигает насыщения, величина которого определяется внутренним сопротивлением источника питания. Длительность шунтирующего разряда, определенная по уровню 0.1, растет от 5 до 25 мкс в диапазоне значений W $0.5\text{--}2.5 \text{ ГВт/см}^2$ и далее достигает насыщения величиной около 30 мкс.

По сравнению с однократным режимом генерации лазерного излучения переход к частотному режиму и сканированию по поверхности мишени сопровождается следующими особенностями. Ток шунтирующего разряда уменьшается в $1.5\text{--}3.5$ раза, а его длительность снижается до значений $5\text{--}15$ мкс и слабо зависит от частоты импульсов в интервале $2\text{--}10 \text{ Гц}$. Амплитуда напряжения горения увеличивается до значений $60\text{--}280 \text{ В}$, растет в этом интервале с ростом частоты лазерных импульсов и падает с ростом плотности мощности лазерного излучения.

Такое поведение параметров разряда указывают на снижение степени шунтирования магнетронного разряда и его можно рассматривать как переходной от дугового к тлеющему [5]. В частотном режиме облучения лазерной мишени снижается воспроизводимость величины тока и напряжения горения переходного разряда. Отклонение амплитуды тока достигало 50% от ее среднего значения. Это быстрее всего связано с условиями формирования катодного пятна. При фокусировке лазерного излучения на отдельную мишень катодное пятно не привязано к лазерному эрозионному пятну, а формируется в произвольных местах поверхности катода магнетрона, которые могут отличаться электрофизическими свойствами.

Полученные результаты свидетельствуют, что шунтирующий дуговой разряд влияет на характеристики комбинированной плазмы.

Рассмотренная выше методика магнетронно-лазерного формирования пленочных покрытий была использована как для отдельного магнетронного нанесения пленок оксида титана и ла-

зерного нанесения пленок титана, так и для комбинированного формирования покрытия в следующих условиях. Геометрия расположения элементов 1, 2 и 3 (рис. 1): $X = 40 \text{ мм}$, $Y = 70 \text{ мм}$, $\varphi = 25^\circ$. Мощность магнетронного разряда 120 Вт . Плотность мощности лазерного излучения на мишени $9 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$ при двухимпульсном режиме излучения с частотой 2 Гц на длине волны 532 нм . Область сканирования излучения на мишени $1 \times 1 \text{ см}^2$. Давление аргон-кислородной смеси газов 0.8 Па . Расход кислорода задавался оптической системой управления и соответствовал магнетронному осаждению TiO_2 со скоростью осаждения 8 нм/мин . Время осаждения $30\text{--}60 \text{ мин}$. Полученные покрытия можно рассматривать как массив нано- и микроразмерных металлических частиц титана в диэлектрической оксидной матрице.

Заключение

Формирование комбинированного магнетронно-лазерного плазменного потока при плотности мощности лазерного излучения более 0.5 ГВт/см^2 сопровождается образованием импульсного дугового разряда, который шунтирует магнетронный разряд и влияет на характеристики комбинированного потока. Степень влияния шунтирующего разряда зависит от плотности мощности лазерного излучения и режима его генерации (однократный или частотный). Комбинированный плазменный поток позволяет формировать покрытия, представляющие собой массив нано- и микроразмерных металлических частиц в диэлектрической оксидной матрице.

Список литературы

1. Voevodin A.A., Fitz T.A., Zabinski J.S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 2002. V. 20. P.1434.
2. Jones J.G., Voevodin A.A. // Surf. Coat. Technol. 2004. V. 184. P.1.
3. Voevodin A.A., Hu J.J., Fitz T.A., Zabinski J.S. // Surf. Coat. Technol. 2001. V. 146-147. P.351.
4. Jelinek M., Kocourek T., Zemek J., Novotný M., Kadlec J. // Appl. Phys. A. 2008. V. 93. P. 633.
5. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 575с.

COMBINED MAGNETRON DEPOSITION OF TITANIUM OXIDE AND OF TITANIUM LASER PLASMA

A.P. Burmakou, V.N. Kuleshov, K.Yu. Prokopchik
Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., Minsk 220030, Belarus,
Burmakov@bsu.by, KuleshovV@Yandex.ru, kir.prokopchik@gmail.com

The structure chart of the installation for the combined magnetron-laser deposition of coatings is considered. The electrical characteristics of the magnetron discharge are analyzed under the conditions of the simultaneous reactive magnetron sputtering and laser erosion of titanium. The formation of the pulse arc discharge that is initiated with the laser plasma is established. The influence of the deposition conditions on the electrical characteristics of this discharge is determined. The conditions of the combined forming of the film coatings on basis of titanium oxide are represented.